

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.02.009

ABR-AO生化沉淀一体化污水处理工艺设计

黄良波¹, 黄世浏², 曹贵华³, 刘贤斌¹, 奚洋²

(1. 中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北 武汉 430010; 2. 海南大和成环境工程有限公司, 海南 海口 570100; 3. 江苏天雨环保集团有限公司, 江苏 扬州 225000)

摘要: 三亚某水质净化厂扩建规模为 $4.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 采用ABR-AO生化沉淀一体化工艺。该工艺的显著特点是分级曝气(O1~O5池)、二沉池V形构造、斜管沉淀池单斜壁结构, 不仅能节省土建和占地, 而且明显提高了生化系统的MLSS浓度、降低污泥负荷值, 脱氮除磷效果突出, 同时可节约缺氧脱氮碳源投加量。试运行37 d, 一体化池出水COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN、TP平均值分别为12.0、0.31、10.54、0.37 mg/L, 显著优于《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准, 为后续反硝化深床滤池出水稳定达到地表水准Ⅳ类水质指标创造了有利条件, 亦为低C/N比污水低成本脱氮除磷提供了参考。

关键词: 低C/N比; ABR-AO一体化工艺; 脱氮除磷; 分级曝气

中图分类号: TU992.3 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2022)02-0054-05

Design of ABR-AO Biochemical Sedimentation Integrative Wastewater Treatment Process

HUANG Liang-bo¹, HUANG Shi-liu², CAO Gui-hua³, LIU Xian-bin¹, XI Yang²

(1. Central and Southern China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Wuhan 430010, China; 2. Hainan Dahecheng Environmental Engineering Co. Ltd., Haikou 570100, China; 3. Jiangsu Tianyu Environmental Protection Group Co. Ltd., Yangzhou 225000, China)

Abstract: The expansion scale of a water purification plant in Sanya is $4.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, and the process is integrative ABR-AO biochemical sedimentation. The process is characterized by staged aeration (O1-O5 tanks), V-shaped structure of the secondary settling tank and single inclined wall structure of the inclined tube sedimentation tank. It can not only save civil construction and footprint area, but also significantly improve the MLSS of the biochemical system and reduce the sludge load. In addition, it has prominent nitrogen and phosphorus removal performance, and a lower amount of carbon source for anoxic nitrogen removal. After 37 days of trial operation, average COD, $\text{NH}_3\text{-N}$, TN, TP in the effluent of integrative tank were 12.0, 0.31, 10.54, 0.37 mg/L, respectively, which was superior to the first level A criteria specified in *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918-2002). The process creates an appropriate condition for effluent of the subsequent deep bed denitrification filter to steadily meet the quasi-Ⅳ surface water standard, and provides a reference for low-cost nitrogen and phosphorus removal of low C/N ratio wastewater.

Key words: low C/N ratio; ABR-AO integrative process; nitrogen and phosphorus removal; staged aeration

1 工程概况

三亚某水质净化二厂是紧邻一厂的改扩建提标项目,一厂已建成 $3.0\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 规模,出水执行一级A标准;二厂用地极为受限,既要新建 $4.0\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 强化一级A设施,又要合建 $7.0\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 反硝化深床滤池作为两厂共用深度处理设施,出厂水最终须达到地表水Ⅳ类水质标准方能排放,以满足“美丽三亚、国际三亚”和海南自由贸易港对水环境质量的高要求。水质净化二厂项目总投资约36 717万元,用地面积 3.33 hm^2 。从2020年3月初起,ABR-AO一体化池经过约37 d的调试和试运行,出水即全面接近地表水Ⅳ类水质指标,成功实现了低成本脱氮除磷。

2 工艺设计

2.1 设计进、出水水质

根据一厂实际水质、周边污水厂水质,参考南方污水厂进水水质的变化确定设计进水水质,二级处理出水执行一级A标准,具体见表1。

表1 设计进、出水水质

Tab.1 Design influent and effluent quality

| mg·L ⁻¹ | | | | | | |
|--------------------|-----|------------------|-----|--------------------|----|-----|
| 项目 | COD | BOD ₅ | SS | NH ₃ -N | TN | TP |
| 进水 | 300 | 120 | 150 | 40 | 45 | 4.5 |
| 一级A标准 | 50 | 10 | 10 | 5 | 15 | 0.5 |

2.2 工艺流程

污水处理工艺流程见图1。

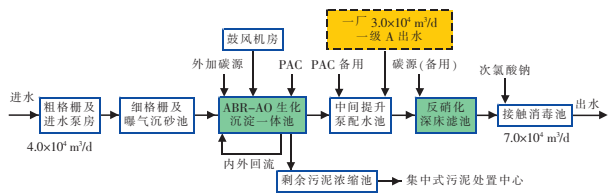


图1 污水处理工艺流程

Fig.1 Flow chart of wastewater treatment process

预处理为常规粗格栅及进水提升泵房、细格栅及曝气沉砂池;二级生化处理采用ABR-AO生化沉淀一体化集约工艺;深度处理采用反硝化深床滤池;消毒采用次氯酸钠接触消毒;剩余污泥经浓缩后送往地块南侧在建的集中式污泥处置中心。

2.3 工艺考虑重点

扩建 $4.0\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 主体工艺的两项出水指标COD、NH₃-N要求显著优于一级A标准,以确保一厂

二厂混合水最后经深床滤池处理后,能稳定达到出厂排放标准,并为今后出水标准再提高到TN≤10 mg/L甚至5 mg/L以下提供充分易达性和简便性。

2.4 ABR-AO生化沉淀一体化池

为便于检修,设2座各 $2.0\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 规模的ABR-AO一体化池。单座尺寸为71.0 m×46.0 m,由2格各 $1.0\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 并联,其沉淀池共用排泥泵池和排泥阀井。一体化池示意图图2。

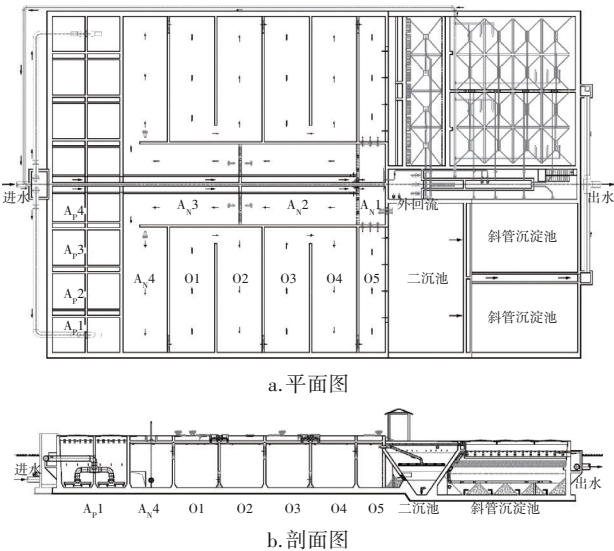


图2 一体化池示意

Fig.2 Schematic diagram of integrated tank

水力流程为:沉砂池出水 and 外回流污泥→混合配水池→ABR池→内回流 A_N1 脱气池+A_N2~A_N4池→O池→二沉池→加药混凝斜管沉淀池→出水。

推流式升流式ABR^[1]池4格串联2排并联,水深6.30 m,底部进水,集水槽出水,无搅拌机,池底定期静压排泥。HRT=2.36 h,污泥自浓缩^[2]后MLSS达4.5~6 g/L,甚至更高。

外碳源投加点设于缺氧A_N池A_N2处。水深为6.0 m,HRT=3.93 h,设潜水搅拌机脱除N₂气泡并防止污泥沉积。

好氧O池为推流式,采用精确曝气控制DO运行:O1低氧和O2~O5正常(DO按2 mg/L),以及全部O1~O5低氧模式(DO≤前1.0 mg/L~后1.5 mg/L)或正常模式。水深为6.0 m,HRT=6.59 h。

二沉池为矩形竖流式V形澄清池,有效水深4.99 m,池底比生化池底低1.0 m,中下部布水,表面负荷 $2.1\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,不加药,斗底大管口排泥(外回流和剩余污泥)。沉淀效率在98.5%以上。

末端合建斜管沉淀池,属半深度处理,采用喷淋加药→水力管式混合→旋流絮凝反应→悬浮污泥层吸附过滤后斜管沉淀,有效水深4.39 m,水面低于二沉池1.0 m,反应时间 ≥ 0.99 h,表面负荷 $1.39 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,辅助化学除磷和混凝药剂为PAC复合硅藻土,含10%~25%硅藻,穿孔管排泥,加药量和污泥量少,污泥全部回用作为颗粒污泥的凝聚核。

2.5 其他主要工艺参数

$L_s=0.043 \text{ kgBOD}_5/(\text{kgMLSS} \cdot \text{d})$, $\text{MLSS}=5.2 \text{ g/L}$, $\theta_c=15.9 \text{ d}$,需氧量为 $1.69 \text{ kgO}_2/\text{kgBOD}_5$,生化反应总HRT=12.88 h,脱氮速率 $K_{de}=0.037 \text{ kgNO}_3^-/\text{N}/(\text{kgMLSS} \cdot \text{d})$,气水比为4.40,硝化液内回流比200%~300%,污泥外回流比100%~150%。

3 技术特点

① 颗粒污泥与絮状污泥并存^[1,3],加上两级沉淀和气提回流对MLSS的强制截留,生化池MLSS高达4.5~6 g/L或以上,生化反应更加充分。

② 面式气提装置将二沉池的中层悬浮活性污泥源源不断地回流到生化池,絮体污泥经气提作用反复淘洗,有助于颗粒污泥的形成和富集。

③ 部分同程/短程硝化反硝化:高污泥浓度和低DO曝气结合,形成颗粒污泥内部缺氧厌氧微环境,脱氮速率高于常规 A_{20} 工艺。

④ 厌氧ABR技术^[1]与反硝化除磷^[4]相结合:

ABR池的水解酸化作用既改善了进水可生化性,提高B/C比,又产酸和充分释磷,可节约缺氧脱氮碳源投加量,而且厌氧消化使得系统污泥总产量减少。

⑤ 一体化整合与模块化设计:分级曝气O1~O5池、二沉池V形构造、斜管沉淀池单斜壁结构,三者融为一体,空间彼此契合,节省土建和占地。

4 一体化池试运行结果及分析

4.1 调试期碳源投加

三水结晶乙酸钠(25 kg/包)按 CH_3COONa 含量为59%计,投加量从80 mg/L逐日上升至最高值157.9 mg/L,再下降并稳定在60 mg/L。

4月份调试期13 d水质数据及碳源投加量分别见表2、3。

表2 4月份调试期13 d水质

Tab.2 Water quality during 13-day commissioning in April

| 项目 | | COD | | NH ₃ -N | | TN | | TP | |
|------------------------------|----|-------|------|--------------------|------|-------|-------|-------|------|
| | | 进水 | 出水 | 进水 | 出水 | 进水 | 出水 | 进水 | 出水 |
| 数值/ (mg·L ⁻¹) | 最高 | 170 | 25 | 55.7 | 1.02 | 60.4 | 17 | 8.09 | 1.33 |
| | 最低 | 128 | 14 | 26.9 | 0.15 | 32.6 | 7.74 | 5.41 | 0.08 |
| | 平均 | 150 | 17.8 | 40.3 | 0.41 | 46.03 | 12.19 | 6.56 | 0.39 |
| 去除率/% | 最高 | 90.59 | | 99.62 | | 81.83 | | 99.01 | |
| | 最低 | 84.94 | | 98.17 | | 62.30 | | 77.80 | |
| | 平均 | 88.16 | | 99.04 | | 73.13 | | 93.83 | |
| 注：进、出水并非对应某一天的数值,而是统计值。 | | | | | | | | | |

表3 调试期碳源投加量和脱氮率

Tab.3 Carbon source dosage and nitrogen removal rate during commissioning

| 项 目 | 1日 | 2日 | 3日 | 7日 | 9日 | 10日 | 11日 | 13日 | 15日 | 17日 | 22日 | 27日 | 30日 |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 结晶乙酸钠投加包数/(包·格 ⁻¹) | 12 | 15 | 17 | 26 | 30 | 28 | 26 | 21 | 15 | 12 | 12 | 12 | 12 |
| 结晶乙酸钠质量(共4格)/t | 1.20 | 1.50 | 1.70 | 2.60 | 3.00 | 2.80 | 2.60 | 2.10 | 1.50 | 1.20 | 1.20 | 1.20 | 1.20 |
| 污水处理量/($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$) | 1.5 | 1.55 | 1.6 | 1.8 | 1.9 | 1.95 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 进水COD/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) | 152 | 148 | 162 | 128 | 133 | 139 | 145 | 132 | 145 | 166 | 168 | 170 | 165 |
| 进水TN/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) | 44.3 | 46.5 | 45.6 | 44 | 47.5 | 48.2 | 46.1 | 46.9 | 32.6 | 42.6 | 48.9 | 60.4 | 44.8 |
| 进水COD/TN | 3.43 | 3.18 | 3.55 | 2.91 | 2.80 | 2.88 | 3.15 | 2.81 | 4.45 | 3.90 | 3.44 | 2.81 | 3.68 |
| 结晶乙酸钠投加剂量/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) | 80 | 96.8 | 106.3 | 144.4 | 157.9 | 143.6 | 130 | 105 | 75 | 60 | 60 | 60 | 60 |
| 折合纯乙酸钠COD/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) | 32.1 | 38.8 | 42.6 | 58.0 | 63.3 | 57.6 | 52.2 | 42.1 | 30.1 | 24.1 | 24.1 | 24.1 | 24.1 |
| 去除氮所需乙酸钠COD当量/ ($\text{mgCOD} \cdot \text{mg}^{-1} \text{NO}_3^- \text{-N}$) | 3.66 | 3.66 | 3.66 | 3.66 | 3.66 | 3.66 | 3.66 | 3.66 | 3.66 | 3.66 | 3.66 | 3.66 | 3.66 |
| 外碳源去除的硝态氮量/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) | 8.77 | 10.61 | 11.65 | 15.83 | 17.31 | 15.74 | 14.25 | 11.51 | 8.22 | 6.58 | 6.58 | 6.58 | 6.58 |
| 出水TN实测值/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) | 16.70 | 17.00 | 17.00 | 12.50 | 10.20 | 9.88 | 9.56 | 10.10 | 11.90 | 7.74 | 11.40 | 12.90 | 11.58 |
| 污水内碳源去除的TN/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) | 18.83 | 18.89 | 16.95 | 15.67 | 19.99 | 22.58 | 22.29 | 25.29 | 12.48 | 28.28 | 30.92 | 40.92 | 26.64 |
| 污水内碳源的TN去除率/% | 42.51 | 40.63 | 37.18 | 35.61 | 42.09 | 46.85 | 48.35 | 53.92 | 38.28 | 66.39 | 63.24 | 67.75 | 59.47 |
| 最终脱氮率/% | 62.30 | 63.44 | 62.72 | 71.59 | 78.53 | 79.50 | 79.26 | 78.46 | 63.50 | 81.83 | 76.69 | 78.64 | 74.15 |

表 3 中乙酸钠 COD 当量按 0.68 gCOD/g 纯乙酸钠计;去除单位硝态氮所需乙酸钠 COD 当量,按 3.66 mgCOD/mgNO₃⁻-N 计^[5];投 60 mg/L 固体商品约可去除 6.58 mg/L 的 TN。

随着投加量增加,TN 脱氮率由初期 62.30% 升至 79% 以上;之后,剂量虽然逐渐减小至 60 mg/L,但 TN 脱氮率并未明显下降,出水 TN 仍然稳定合格。原因是反硝化菌污泥龄逐渐得到延长,反硝化菌丰度增加,内碳源反硝化脱氮效率提升,内碳源脱氮率由月初 3 d 平均 40.10% 升至月末 3 d 平均

63.49%,跃升明显。

4.2 试运行结果

自 5 月初—6 月 12 日,碳源剂量稳定在 60 mg/L,进水 C/N 比依然超低,但运行更为稳定成熟,试运行 37 d 水质见表 4。

对比表 2 和表 4 中的数据可以看出,出水水质稳步提升,工程改造后一体化池出水 COD、NH₃-N、TN、TP 平均值分别下降至 12.0、0.31、10.54、0.37 mg/L,降幅虽不大,但总体稳健向好,表明设计和运行均获得可喜成功。

表 4 试运行期间运行水质

Tab.4 Water quality during commissioning

| 项 目 | | COD | | NH ₃ -N | | TN | | TP | |
|--------------------------|-----|-------|------|--------------------|------|-------|-------|-------|------|
| | | 进水 | 出水 | 进水 | 出水 | 进水 | 出水 | 进水 | 出水 |
| 数值/(mg·L ⁻¹) | 最高 | 200 | 17.0 | 46.6 | 0.55 | 50.60 | 14.70 | 8.39 | 0.64 |
| | 最低 | 128 | 7.0 | 30.3 | 0.10 | 33.80 | 8.70 | 4.52 | 0.20 |
| | 平均值 | 169 | 12.0 | 40.9 | 0.31 | 44.91 | 10.54 | 6.54 | 0.37 |
| 去除率/% | 最高 | 96.22 | | 99.73 | | 80.70 | | 96.86 | |
| | 最低 | 89.74 | | 98.66 | | 67.46 | | 85.84 | |
| | 平均 | 92.79 | | 99.24 | | 76.39 | | 94.30 | |

注:进、出水并非对应某一天的数值,而是统计值。

4.3 分析与讨论

① 进水低碳源、高氮磷,BOD₅/TN 仅 0.90~1.79,平均值 1.17,BOD₅/TP 为 5.57~15.49,平均值 9.02,显然,该污水脱氮除磷极度缺乏碳源,必须适量投加外碳源。

② 投加外碳源后,观察到出水 TN 和 TP 同步大幅改善,实现了“一碳两用”。5 月中旬启用辅助化学除磷之前,系统 TP 去除率已达 93.83%,而常规 A²O 法生物除磷效率在 50%~75%,本工程进水 TP 均值 6.54 mg/L,出水 TP 均值低至 0.37 mg/L,出乎预料,推测是反硝化除磷^[4]作了很大贡献。

③ 大幅度节约外加碳源,按现行计算方法以典型水质计算^[6-7],投加量应为 160~440 mg/L(以固体商品计,下同),实际仅 60 mg/L 即获满意的脱氮除磷效果。同时,依靠工艺强化设计获得了脱氮贡献 6.84 mg/L,故系统强化获得了 62.4 mg/L 的碳源增效,即节约碳源 104%,按市价 2 850 元/t 计,污水单位运行成本降低了 0.178 元/m³。

④ 低碳源污水脱氮贡献率,按内碳源脱氮 COD 当量实测极限值 3.06 mgCOD/mgNO₃⁻-N 去除量计^[8],测算该污水在常规 A²O 工艺下内碳源脱氮

贡献率平均为 39.58%,另外的 22.05% 为工艺强化贡献率,14.76% 为外碳源贡献率,三者之和构成试运行期 TN 去除率均值 76.39%。

⑤ COD 去除率均值 92.79%,NH₃-N 去除率均值 99.24%,出水水质稳定达标。特别是在进水 NH₃-N 高达 40~55 mg/L 的情况下,实测出水却低至 0.4~1.0 mg/L 左右,表明系统硝化反应彻底。

5 结论

① 采用 ABR-AO 生化沉淀一体化工艺处理低碳源污水,TN 去除率高于常规 A²O 工艺,外碳源对 TN 脱氮贡献率为 14.76%,节约了 104% 的碳源药剂费用,系统 TN 去除率达 76.39%。

② 厌氧 ABR 技术与反硝化除磷相结合,污水 B/C 比得以提高,外碳源“一碳两用”,生物除磷效率达 94.30%,出水 TP 均值 0.37 mg/L。

③ ABR-AO 生化沉淀一体化池的 COD、NH₃-N 去除率分别达 92.79%、99.24%;出水平均 COD、NH₃-N、TN 分别为 12.0、0.31、10.54 mg/L。

④ ABR-AO 生化沉淀一体化工艺流程短、占地省、造价低,简化了运行管理,节约了运行费用,最终提升了污水处理厂的经济效益。

参考文献:

- [1] 王欣霞, 林英姿, 陈淑芳, 等. 厌氧折流板反应器的研究与应用[J]. 辽宁化工, 2008, 37(10): 703-705.
WANG Xinxia, LIN Yingzi, CHEN Shufang, *et al.* Research and application of anaerobic baffled reactors [J]. Liaoning Chemical Industry, 2008, 37(10): 703-705(in Chinese).
- [2] 刘庄泉, 杨健. 多级高浓度自浓缩活性污泥法脱氮除磷研究[J]. 江苏环境科技, 2006, 19(2): 38-39, 42.
LIU Zhuangquan, YANG Jian. A study on multilevel high concentrations and auto-concentrating activated sludge technology to achieve nitrogen and phosphorus removal [J]. Jiangsu Environmental Science and Technology, 2006, 19(2): 38-39, 42(in Chinese).
- [3] 王荣昌, 文湘华, 钱易. 生物膜反应器中好氧颗粒污泥形成机理[J]. 中国给水排水, 2004, 20(3): 5-8.
WANG Rongchang, WEN Xianghua, QIAN Yi. Formation mechanism of granular sludge in suspended carrier biofilm reactor [J]. China Water & Wastewater, 2004, 20(3): 5-8(in Chinese).
- [4] 吴昌永, 彭永臻, 彭轶. A²O工艺的反硝化除磷特性研究[J]. 中国给水排水, 2008, 24(15): 11-14.
WU Changyong, PENG Yongzhen, PENG Yi. Study on characteristics of denitrifying phosphorus removal in A²O process [J]. China Water & Wastewater, 2008, 24(15): 11-14(in Chinese).
- [5] 杨敏, 孙永利, 郑兴灿, 等. 不同外加碳源的反硝化效能与技术经济性分析[J]. 给水排水, 2010, 36(11): 125-128.
YANG Min, SUN Yongli, ZHENG Xingcan, *et al.* Denitrification efficiency and techno-economic analysis of different exotic additional carbon source [J]. Water & Wastewater Engineering, 2010, 36(11): 125-128 (in Chinese).
- [6] 周丹, 周雹. 污水脱氮工艺中外部碳源投加量简易计算方法[J]. 给水排水, 2011, 37(11): 38-41.
ZHOU Dan, ZHOU Bao. Simple calculation method for the outside carbon source dosage for nitrogen removal process in wastewater treatment [J]. Water & Wastewater Engineering, 2011, 37(11): 38-41 (in Chinese).
- [7] 陈军. 污水处理厂乙酸钠加药间设计探讨[J]. 环境科学与管理, 2012, 37(12): 102-104.
CHEN Jun. Process design for CH₃COONa dosage room in sewage treatment plant [J]. Environmental Science and Management, 2012, 37(12): 102-104 (in Chinese).
- [8] 王社平, 王卿卿, 惠灵灵, 等. 分段进水A/O脱氮工艺反硝化速率的测定[J]. 环境工程, 2008, 26(3): 56-58.
WANG Sheping, WANG Qingqing, HUI Lingling, *et al.* The determination of denitrification rate of step-feed A/O nitrogen removal process [J]. Environmental Engineering, 2008, 26(3): 56-58(in Chinese).

作者简介: 黄良波(1982-), 男, 四川乐山人, 大学本科, 高级工程师, 海南分院副总工程师, 主要从事给水排水工程和环境工程设计和研究工作, 多次获得湖北省、海南省规划咨询、勘察设计一、二、三等奖, 获得海口市委市政府“双创先进个人”称号。

E-mail: 94424764@qq.com

收稿日期: 2020-12-13

修回日期: 2021-01-26

(编辑: 孔红春)

全面推行河长制湖长制, 维护河湖健康生命